

**А.Н. БОРИСЕНКО**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**А.Б. БОГАЕВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф. ХНАДУ;  
**Б.И. КУБРИК**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»  
**Е.В. СОСИНА**, ассистент, НТУ «ХПИ»

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВС С ПОВЫШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

В статье приводятся блок-схема, динамические характеристики и аналитические выражения, которые описывают работу стенда для испытания двигателя внутреннего сгорания, который имеет повышенное быстродействие благодаря наличию в нем интегратора и сумматора.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, динамические характеристики, испытательный стенд, быстродействие.

**Постановка проблемы.** На практике перед установкой на транспортное средство, землеройную машину и т.д. нового или отремонтированного ВС не обходимо выполнить его испытания по определенной программе, охватывающей достаточно широкую номенклатуру режимов работы двигателя, оснащенного или неоснащенного средствами электронной техники. Как правило, такая программа предусматривает вывод ДВС на заданный скоростной и нагрузочный режимы за определенное время и технические возможности испытательного стенда должны позволять это реализовать, то есть стенд должен обладать быстродействием, не хуже некоторого значения.

**Анализ литературы** показывает, что например, в [1] синтезируется устройство, позволяющее вывести ДВС на заданный нагрузочный режим при условии, что изначально двигатель работает в близком к номинальному скоростном режиме. В работе [2] рассматриваются технические средства, в том числе испытательные стенды для судовых установок, обеспечивающие работу дизеля по винтовой характеристике при нескольких фиксированных частотах вращения. Работа [3] посвящена достаточно сложным компьютерным системам управления и испытания ДВС, которые предполагают наличие у двигателей электронных регуляторов скорости вращения и т.д. Такие системы и построенные на их базе испытательные стенды крайне сложно применять на большинстве серийных отечественных ДВС, которые мало оснащены электроникой. Технические средства, рассмотренные в [4], также в большей степени подходят в ДВС, оснащенными средствами электроники, а не к серийным отечественным двигателям. В работе [5] описана бортовая система диагностики тепловозной энергоустановки, в состав которой входит стенд для испытания дизель-генератора.

Такой базовый стенд может быть использован для испытания любого серийного ДВС, вал которого имеет механическую связь с валом электродвигателя или генератора, и работающего на скоростной, нагрузочной, тепловозной или винтовой характеристике.

**Цель статьи** – на основе базового устройства построить испытательный стенд с повышенным быстродействием, составить его математическую модель и исследовать его динамические характеристики.

**Основная часть.** На рис. 1 представлена блок-схема разработанного стенда; на рис. 2 – временные диаграммы входных и выходных сигналов элементов стенда.

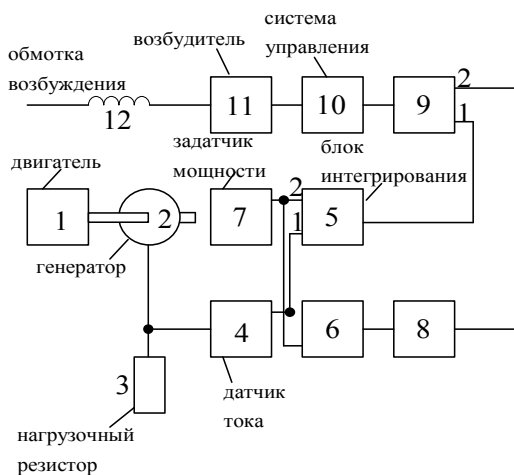


Рис. 1 – Блок-схема стенда с ускоренным выходом в заданный режим

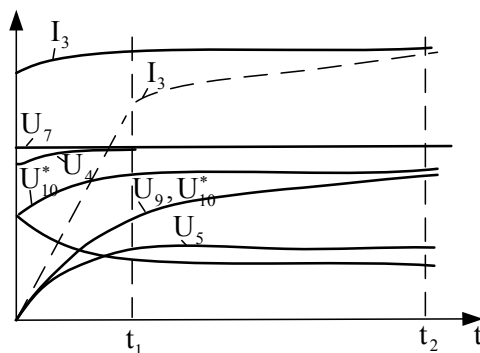


Рис. 2 – Временные диаграммы, иллюстрирующие работу стенда с ускоренным выходом в заданный режим

Описываемый стенд отличается от базового наличием интегратора и сумматора и работает следующим образом.

При заданной частоте вращения двигателя 1 появление сигнала на выходе датчика 7 мощности влечет за собой мгновенное появление напряжения  $U_8$  на выходе усилителя 8 (см. рис. 1), которое проходит через сумматор 9 на вход системы возбуждения 10. В этот начальный момент времени выходное напряжение блока 5 интегрирования сохраняет начальное нулевое значение. Появление входного сигнала системы 10 управления возбудителем приводит к возникновению электрического тока в обмотке 12 возбуждения и появлению ЭДС на обмотке якоря генератора. Под действием последней через нагрузочный резистор 3 протекает ток, в результате чего на выходе 4 датчика тока формируется сигнал, пропорциональный току нагрузки и поступающий на вычитающий вход элемента 6 сравнения. Следовательно, выходной сигнал элемента 6 сравнения равен разности сигналов, пропорциональных заданию мощности и фактическому значению мощности, поскольку сопротивление резистора 3 постоянно. Так как элементы схемы работоспособны лишь при положительных сигналах на их входах и для устойчивой работы системы регулирования мощности генератора в этом случае сигнал датчика обратной связи должен быть меньше уставки, то  $U_7 - U_4 > 0$ . Именно эта разность в момент  $t = 0$  после усиления и соответствующих преобразований определяет ток, протекающий по нагрузочному резистору 3 и, следовательно, мощность генератора 2.

Указанная разность напряжений приложена к входам блока 5 интегрирования, на выходе которого при  $t > 0$  действует сигнал, равный интегралу разности по времени

$$U_5(t) = K_5 \int_0^t [U_1 - U_4(t)] dt,$$

где  $K_5$  – коэффициент передачи блока 5 интегрирования.

Указанный сигнал растет с течением времени, вызывая увеличение сигнала  $U'_{10}$  на входе системы 10 управления возбудителем, тока возбуждения в обмотке 12 возбуждения, ЭДС генератора 2 и, следовательно, тока в нагрузочном резисторе 3. В результате этого выходное напряжение датчика 4 тока генератора увеличивается, разность  $U_7 - U_4$  уменьшается, вызывая уменьшение выходного сигнала усилителя (см. рис. 1), а также снижение скорости нарастания сигнала блока 5 интегрирования

$$U_8 = K_8 [U_2 - U_4(t)],$$

где  $K_8$  – коэффициент передачи усилителя 8.

Последнее приводит к уменьшению скорости возрастания сигналов на входах системы 10 управления возбудителем и возбудителя 11, снижению скорости нарастания тока возбуждения в обмотке 12, ЭДС генератора 2 и тока нагрузочного резистора 3. Вследствие этого сигнал на инвертирующем входе блока 5 интегрирования с течением времени все медленнее растет, приближаясь к сигналу задатчика 7 мощности. В момент наступления равенства  $U_7 = U_4$  электрическая мощность генератора, равная  $I_3^2 r_3$  ( $I_3$  – ток нагрузочного резистора 3,  $r_3$  – сопротивление резистора 3), совпадает с заданным с помощью задатчика 7 значением, сигналы на выходах элемента 6 сравнения усилителя 8 становятся равными нулю, а выходной сигнал блока 5 интегрирования становится неизменным. На рис. 2 этому соответствует момент  $t = t_1$ . При постоянстве частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания, испытываемого на стенде, установление такого равновесного режима означает, что мощность ДВС равна установленному с помощью задатчика 7 значению.

Для получения математического выражения, позволяющего определить время установления заданного значения мощности на валу испытываемого двигателя в вышеописанном случае, запишем передаточные функции звеньев, входящих в блок-схему. При этом в качестве индекса передаточной функции примем номер элемента на схеме. Передаточную функцию элемента 6 сравнения примем равной единице, т.е.  $K_6(P) = 1$ , а остальные элементы имеют следующие передаточные функции:

$$K_5(P) = \frac{K_5}{P}; \quad K_8(P) = K_8; \quad K_9(P) = K_9; \quad K_{10}(P) = K_{10}; \quad K_{11}(P) = K_{11}; \\ K_1(P) = K_2; \quad K_4(P) = K_4; \quad K_3(P) = K_3,$$

где  $P$  – оператор Лапласа.

В соответствии с этим передаточная функция системы, в которой входным сигналом является сигнал задатчика 7 мощности, а выходным – ток в нагрузочном резисторе 3, представлена

$$K(P) = \frac{K_8 K_D + K_5 K_D}{P + K_4 K_8 K_D P + K_4 K_5 K_D} \quad (1)$$

где  $K_D = K_2 K_3 K_{10} K_{11}$ .

Характеристикой, которая наиболее ярко отражает продолжительность переходного процесса, а в данном случае – время установления заданного

значения мощности генератора, является переходная функция. Последняя в данном случае представляет собой зависимость тока нагрузочного резистора от времени при скачкообразном изменении сигнала задатчика 7 мощности от нулевого значения до единичного. Как известно, изображение по Лапласу переходной функции определяется по формуле

$$h(P) = \frac{K(P)}{P}. \quad (2)$$

С учетом (1) выражение (2) примет вид

$$h(P) = \frac{K_8 K_{\mathcal{D}} P + K_5 K_{\mathcal{D}}}{P(K_4 K_8 K_{\mathcal{D}} P + P + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}})}.$$

В соответствии с теорией операционного исчисления последнее выражение имеет во временной области следующий оригинал:

$$h(t) = \frac{K_8 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} e^{\frac{K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} t} - \frac{1}{K_4} e^{\frac{K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} t} + \frac{1}{K_4}. \quad (3)$$

Если величина указанного скачка сигнала задатчика 7 мощности составляет  $U_7$ , то ток нагрузочного резистора 3 определяется

$$i_3(t) = U_7 \left[ \frac{K_8 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} e^{\frac{K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} t} - \frac{1}{K_4} e^{\frac{K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_5 K_{\mathcal{D}}} t} + \frac{1}{K_4} \right]. \quad (4)$$

Из полученного выражения следует, что сразу же после появления напряжения задатчика 7, т.е. при  $t = 0$  ток резистора 3 равен

$$i_3(0) = \frac{K_7 K_8 K_{\mathcal{D}}}{1 + K_4 K_8 K_{\mathcal{D}}} = \frac{U_7}{1/K_8 K_{\mathcal{D}} + K_4} \quad (5)$$

Заканчивается же переходной процесс при  $t \rightarrow \infty$  и величина тока нагрузки определяется выражением

$$i_3(\infty) = \frac{U_7}{K_4}. \quad (6)$$

Во всех случаях, когда мощность двигателя отличается от заданного значения,  $U_4 \neq U_7$ , разность этих напряжений через элемент 6, усилитель 8 и сумматор 9 мгновенно воздействует на систему 10 управления возбудителем, минуя блок 5 интегрирования, сигнал на выходе которого, изменяется медленно, вызывая практически мгновенное изменение мощности генератора 2 и, следовательно, мощности двигателя 1, приближая ее к заданному с помощью задатчика 7 значению. Далее вступает в работу блок 5 интегрирования, выходной сигнал которого изменяется до тех пор, пока  $U_4 \neq U_7$ . Как только фактическая мощность двигателя совпадает с заданной,  $U_4 - U_7 = 0$ , процесс интегрирования прекращается. При этом выходные напряжения сумматора 9 и всех остальных элементов стенда становятся неизменными и переходной процесс заканчивается. В этом случае время переходного процесса (время от перехода стенда от одного установившегося значения мощности двигателя до другого установившегося значения мощности двигателя) равно времени, в течение которого выходной сигнал блока 5 интегрирования изменяется от значения  $U_5 = U_8$  до значения, при котором мощность генератора (и двигателя) равна заданной величине, причем сигнал усилителя  $U_8$  однозначно связан с заданием мощности.

В случае же использования штатного стенда тепловозных ДВС время переходного процесса равно времени, в течение которого выходное напряжение блока интегрирования изменяется от некоторого начального значения, которое не связано с новым значением задания мощности, до значения, соответствующего окончанию переходного процесса. Для случая, когда указанное начальное значение нулевое, на рис. 2 приведена штрихпунктирная кривая  $U_5(U'_{10})$ . Как видно из рисунка  $t_1 < t_2$ , т.е. время установления требуемой мощности двигателя уменьшается.

Экспериментальные исследования рассмотренного стенда при испытании ДВС с газотурбинным наддувом мощностью 1000 и 2000 л.с. показали, что его быстродействие достаточно высокое, а время выхода двигателя на заданный мощный режим определяется продолжительностью разгона турбокомпрессора до оборотов, при которых обеспечивается требуемое давление наддува.

**Вывод.** Исследования показали, что введение в схему базового стенда интегратора и сумматора существенно повысило быстродействие испытательного стенда.

**Список литературы:** 1. Борисенко А.Н., Чемоданов О.И. Анализ показателей качества систем автоматического регулирования скорости дизеля с учетом нелинейности сервопривода// Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков, 2003. – №21. – 203 с. – С.7–12. 2. Ле Ван Дием. Модели и алгоритмы технического диагностирования судовых дизельных установок в процессе эксплуатации: Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата

технических наук/Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. – Санкт-Петербург, 2006. – 24с. **3.** Двигуни внутрішнього згоряння. Т.3. Комп'ютерні системи керування. *Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф.* – Харків: Прапор, 2004. –314с. **4.** *Борисенко А.Н., Обод П.С., Лавриненко О.В.* Современные системы и средства контроля технического состояния дизельных двигателей// Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – №56. –165 с. – С. 26 –34. **5.** *Борисенко А.Н., Невяжский Г.Я., Соболев В.Н.* Встроенная (бортовая) система диагностирования ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: ХГПУ, 1995, вып. 55. – с.251. – С. 48–54.

*Поступила в редколлегию 06.12.2012*

УДК 621.625.032

**Моделирование и построение стенда для испытаний ДВС с повышенными динамическими характеристиками / А.Н. Борисенко, А.Б. Богаевский, Б.И. Кубрик, Е.В. Сосина // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та приладобудування, 2013. – № 8 (982 ). – С. 7-13. Бібліогр.: 5 назв.**

У статті приводяться блок-схема, динамічні характеристики і аналітичні вирази, що описують роботу стенду для випробування двигуна внутрішнього згоряння, який має підвищену швидкість завдяки наявності в ньому інтегратора і суматора.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згоряння, динамічні характеристики, випробувальний стенд, швидкодія.

In the article are presented flow-chart, dynamic descriptions and analytical expressions, describing work of stand for the test of combustion engine which possesses the promoted fast-acting due to a presence in it the integrator and summarization.

**Keywords:** combustion engine, dynamic descriptions, tent-bed test, fast-acting.